

文章编号: 1001-3806(2011)05-0715-03

2 维光束全偏振参量测量技术研究

冯伟伟¹, 马国利¹, 贾天俊¹, 程翔², 陈立刚³

(1. 滨州学院 物理与电子科学系 理论物理研究所, 滨州 256603; 2. 滨州学院 自动化系, 滨州 256603; 3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 为了准确测量目标的全偏振参量, 采用数值模拟计算系统测量矩阵的范数条件数的方法, 对系统微小扰动引起的全偏振态参量的测量影响进行了理论分析和实验验证。结果表明, 当 $\lambda/4$ 波片快轴方向为特定组合角度 ($13^\circ, 50^\circ, 128^\circ, 164^\circ$) 时, 测量系统最优化和效率化。

关键词: 测量与计量; 偏振光; 面阵 CCD; 斯托克斯参量

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.037

Measurement of complete Stokes parameters of 2-D polarized light

FENG Wei-wei¹, MA Guo-li¹, JIA Tian-jun¹, CHENG Xiang², CHEN Li-gang³

(1. Department of Physics and Electronics Science, Institute of Theoretical Physics, Binzhou University, Binzhou 256603, China; 2. Binzhou University Automation Department, Binzhou 256603, China; 3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to measure the complete Stokes parameters of the target accurately, the effect of systematic disturbance on the measurement accuracy was analyzed based on the numerical simulation method of 2-norm condition number of measurement matrices and verified in experiments. Simulation study shows that the measuring system can run optimally and effectively when the angles of the fast axis of the $\lambda/4$ wave-plate are appropriate combination angles (i. e., $13^\circ, 50^\circ, 128^\circ, 164^\circ$).

Key words: measurement and metrology; polarized light; planar CCD; Stokes parameter

引言

地球表面和大气中的任何目标, 在反射和发射电磁辐射的过程中都会产生由它们自身性质和光学基本定律决定的偏振特性。不同物体或同一物体的不同状态(例如粗糙度、含水量、构成材料的理化特征等)会产生不同的偏振状态, 且与波长有密切关系, 形成偏振光谱^[1,4]。由于偏振信息是不同于辐射的另一种表征事物的信息, 相同辐射的被测物体可能有不同的偏振态。偏振光的偏振信息可以用斯托克斯(Stokes)矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 表示, 其中 I 是非偏振光强, Q 和 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。在目前的偏振遥感探测中, 往往忽略了圆偏振信息。例如, 美国的 EOSP 仪器和法国的 POLDER 仪器仅采用偏振

片实现不同偏振方向的辐射信息测量, 因此, 只能计算前 3 个 Stokes 参量^[5-8]。为了获取圆偏振信息, 需要加入相位延迟器件, 如中国科学院上海技术物理研究所研制的卷云探测仪 (CCS) 中加入旋转的 $\lambda/4$ 波片^[9], 用于实现卷云为主要目标同时探测其它云类和大气气溶胶的全偏振态 (4 个 Stokes 参量) 非成像测量。另外, 美国亚利桑那大学偏振实验室开展了基于主动全偏振信息的目标偏振特性研究, 获取了铜制圆锥体的米勒 (Mueller) 矩阵图像。

物体发射或反射的光束的 Stokes 参量带有丰富的物体的信息, 因此, 完全 Stokes 参量的测量在遥感、医学、军事目标辨伪等技术中有着重要的应用。对于从事晶体加工的工作者而言, 经过晶体器件的光束, 必然携带着晶体本身的一些信息, 透射光束的 Stokes 参量的测量必然对器件质量分析提供有价值的参考信息。本文中选用了面阵 CCD 作为光电探测仪器, 在 VISUAL BASIC 集成开发环境中进行软件开发, 完成了对光束偏振态的智能化 2 维测量, 达到了满意的效果。

1 全偏振参量测量的基本原理

一般情况下, 由旋转的 $\lambda/4$ 波片和固定的检偏器

基金项目: 山东省青年自然科学基金资助项目 (ZR2010DQ017); 中国科学院科技创新基金资助项目 (CXJJ-10-S09)

作者简介: 冯伟伟 (1979-), 女, 博士, 主要研究工作是偏振光学。

E-mail: fwwclg@126.com

收稿日期: 2010-11-16; 收到修改稿日期: 2010-12-21

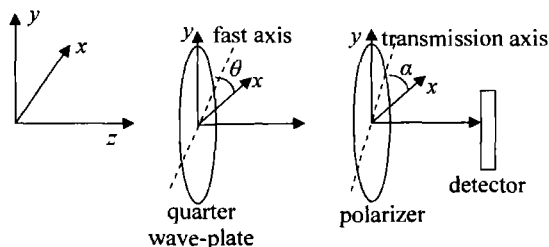


Fig. 1 Schematic diagram of complete Stokes parameter measurement

可以组成全偏振参量测量系统,如图 1 所示。假设检偏器透光轴与参考轴的夹角为 α ,波片快轴与参考轴的夹角为 θ ,应用 Mueller 矩阵表示式,可以很容易得到探测器上的输出灰度值与入射光束 Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 的辐射响应关系为:

$$X_{\alpha,\theta} = A[I + \cos 2\theta \cos(2\theta - 2\alpha)Q + \sin 2\theta \times \cos(2\theta - 2\alpha)U - \sin(2\theta - 2\alpha)V] + D \quad (1)$$

式中, A 为绝对辐射定标系数,可通过积分球辐射源输出的非偏振光 $(I, 0, 0, 0)$ 定标给出; D 为暗电流响应信号。

为了分析方便,一般取检偏器透光轴方向为 x 轴方向,即 $\alpha = 0^\circ$,这时探测器上的输出响应(扣除暗电流)可以表示为:

$$X_{\theta}' = AI[1 + S_1 \cos^2 2\theta + S_2 \sin 2\theta \cos 2\theta - S_3 \sin 2\theta] \quad (2)$$

式中, $X_{\theta}' = X_{\theta} - D$ 为扣除多次暗电流平均后的辐射测量输出;归一化偏振参量 $S_1 = \frac{Q}{I}, S_2 = \frac{U}{I}, S_3 = \frac{V}{I}$ 。

实际测量时,需要电控旋转台带动 $\lambda/4$ 波片旋转,获取 4 个辐射强度输出响应,可建立线性测量方程组:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A} \times \mathbf{S} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{S} = [1 \ S_1 \ S_2 \ S_3]$ 为归一化 Stokes 参量; $\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos^2 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_1 & -\sin 2\theta_1 \\ 1 & \cos^2 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_2 & -\sin 2\theta_2 \\ 1 & \cos^2 2\theta_3 & \sin 2\theta_3 \cos 2\theta_3 & -\sin 2\theta_3 \\ 1 & \cos^2 2\theta_4 & \sin 2\theta_4 \cos 2\theta_4 & -\sin 2\theta_4 \end{bmatrix}$$

为测量矩阵,且

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 为波片快轴的 4 个不同旋转角度位置。

测量矩阵 \mathbf{A} 的条件数是方程组的解 \mathbf{S} 对测量矩阵 \mathbf{A} 、当左端 \mathbf{X}' 中数据有微小扰动时敏感性的一种量度。条件数越小,测量矩阵自身的误差对反演 Stokes 向量的影响就越小。目前偏振遥感中的线偏振参量 (I, Q, U) 测量,只需要一个偏振片旋转 3 个角度 $(0^\circ, 60^\circ$ 和 $120^\circ)$ 即可实现,这种对称旋转角度组合所对应的测量矩阵条件数为最小^[10]。而全偏振参量 (I, Q, U, V) 测量是通过旋转 $\lambda/4$ 波片和固定偏振片的测量方式实现的,要获得最小的条件数,波片的旋转角度不再对称,如表 1 所示,此时测量矩阵条件数 $\text{cond}(\mathbf{A})_{2} = 3.2791$

Table 1 Fast axis angles of wave-plate for minimum condition number of measurement matrices

fast axis angles of wave-plate	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
combination No. 1	13°	50°	128°	164°
combination No. 2	38°	74°	103°	140°

为最小。

由表 1 可以看出:波片快轴最优旋转角度起点并不在 x 轴方向。假如起点选在 x 轴(即 $\theta_1 = 0^\circ$),则通过模拟计算的最小条件数仅能达到 3.4117。实际应用中,为了减小测量时间,按照组合 1 中的角度进行全偏振参量的反演。

2 测量实验及结果

2.1 全偏振态测量实验系统

全偏振态测量系统如图 2 所示,它主要包括任意 generator of random polarized light

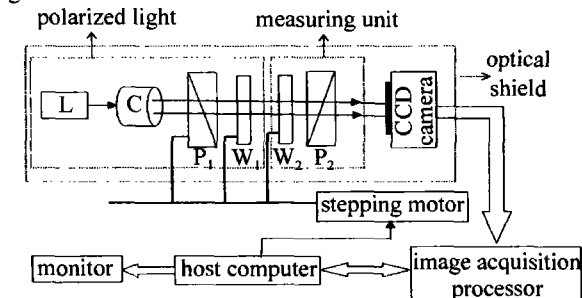


Fig. 2 The diagrammatic sketch of intelligent measurement system of light beam's polarization state, L—light source; C—collimator; P_1, P_2 —polarizer; W_1, W_2 —quarter wave-plate

偏振态发生器和全偏振态检测器两部分组成。光源 L 、扩束准直透镜组 C 、起偏器 P_1 和 $\lambda/4$ 云母波片 W_1 组成偏振光源系统,可以产生不同偏振态的偏振光,用于模仿待测光束。待测光通过测量核心部分—— $\lambda/4$ 云母波片 W_2 和检偏器 P_2 (初始方位角为 x 轴),透射的光强由面阵 CCD 相机接收。光强信息经数据采集卡将数据存入计算机并储存,并可以同时显示器上显示光斑图像。主机通过 D/A 板给步进电机发送驱动信号,旋转台带动波片 W_2 按组合 1 旋转 4 个特定角度,使得 CCD 摄像机摄取 4 个不同方位角的偏振图像信息,然后对 4 幅图像进行图像处理,得到待测光束的 Stokes 矢量。

本实验中选用德国 Basler Vision Technologies 公司生产的 BASLER A302 面阵 CCD:像元大小为 $8.3\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$,像元分辨率为 $782(\text{H}) \times 582(\text{V})$ 。应用积分球辐射源可对相机的暗电流及面均匀性进行定标,提高测量仪器自身的全偏振态测量精度。另外,为了显示方便、并避免由于电机转动等因素引起的光信号漂移,通过编程把每 3600 (60×60) 个像素点作为一个测量单元,共有 117 (13×9) 个测量单元如图 3 所示(像

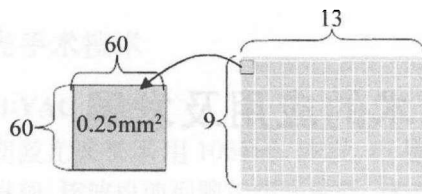


Fig. 3 Physical division of sensitive plate

素点可根据实际情况任意划分, 实验中去掉了边缘的

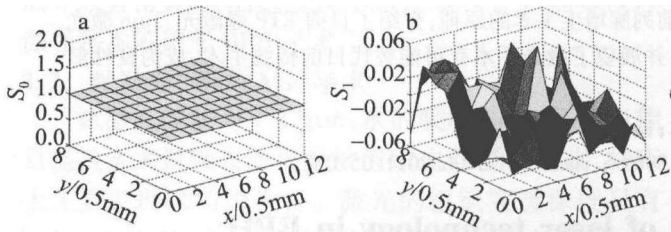


Fig. 4 2-D distribution of right circularly polarized light' Stokes vector

从图 4 中可以看出, S_0 平面是一个数值为 1 的标准平面, 这是归一化的结果; S_1 平面的测量点数值上基本在 ± 0.05 内有起伏, 整体上趋近于理论值 0; S_2 平面的测量点数值上在 -0.05 有微小变动, 整体上略小于理论值 0; S_3 平面的点数值上在 0.996 到 0.998 之间有很微小变动, 整体上也略小于理论值 1。根据圆偏振度的定义可知: $D_c = S_3/S_0 = S_3$, 即归一化的 S_3 平面就是光束的圆偏振度参量平面。因 $\lambda/4$ 云母波片的延迟量误差等原因, 导致偏振发生器产生的非理想右旋圆偏振光的圆偏振度小于 1。

在偏振遥感应用中, 获取目标的偏振度信息可以反演待测目标表面材料和粗糙度的信息, 具有重要意义。图 5 中给出了右旋圆偏振光的偏振度参量的 2 维分布, 可以看出, 2 维偏振度参量测量误差基本控制在 $\pm 0.2\%$ 以内, 但存在着个别区域偏离误差较大 (达到 0.6%), 这些区域可能由于测量系统中的器件缺陷造成的。

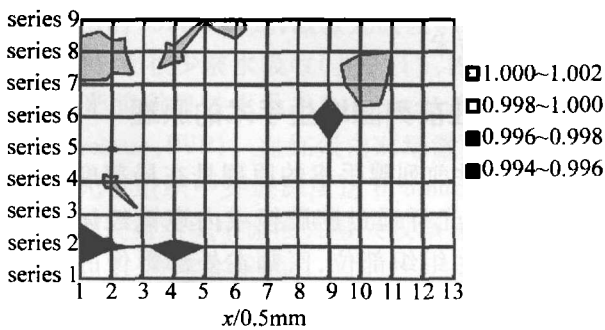


Fig. 5 2-D degree of polarization distribution of right circularly polarized light

3 结论

提出并搭建了一套光束全偏振态参量的 2 维测量

个别像素点)。

2.2 测试结果

该测试系统可以对任意偏振光的全偏振态参量进行 2 维测量。为了便于和理论值对照, 图 4 中给出右旋圆偏振光 (归一化 Stokes 矢量) 的整个通光面的分布测试结果。

系统, 这为整个的 Stokes 参量的全部参量的测量提供了理论和实验的依据。该方法采用面阵 CCD, 精度高, 实现器件整个通光面上的 2 维均匀性测量。另外, 本文中实现了偏振光束测量的自动化, 整个测量过程中, 基于电控旋转台的波片旋转、图像的采集与处理均由微机控制, 这样避免了人工操作带来的误差, 并且较大程度地缩短了时间。

参考文献

- [1] QIAO Y L, YANG Sh Zh, LUO R Zh, *et al.* Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth[J]. High Technology Letters, 2001, 11(7):36-39(in Chinese).
- [2] DESCHAMPS P Y, HERMAN M, PODAIRE A, *et al.* The POLDER instrument: mission objectives[J]. SPIE, 1992, 1746: 72-91.
- [3] SUN X B, HONG J, QIAO Y L, A method of image feature extraction based angle of polarization[J]. Remote Sensing Technology Application, 2005, 20(2):256-260(in Chinese).
- [4] CAO H, SONG L K, PENG H D, *et al.* The study of the relationship between polarized light's incident azimuth and intermediary reflectance[J]. Laser Technology, 2005, 29(1):104-105(in Chinese).
- [5] TRAVIS L D. Remote sensing of aerosols with the earth observing scanning polarimeter[J]. SPIE, 1992, 1747:154-164.
- [6] CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, *et al.* Accuracy analysis of polarimetric measurement based on double Wollaston prisms [J]. Laser Technology, 2008, 32(5):468-470 (in Chinese).
- [7] DEUZE J L, BREON F M, DESCHAMPS P Y, *et al.* Polarization measurements with the airborne version of the POLDER instrument [J]. SPIE, 1992, 1747: 178-187.
- [8] DEUZE J L, COLOUB P, HERMAN M, *et al.* Aerosol retrieval using the POLDER instrument preliminary results [J]. SPIE, 1997, 3121:347-355.
- [9] SHAO W D, WANG P G, ZHENG Q B, *et al.* Polarimetric calibration of airborne remote sensing polarimeter [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(2):137-140 (in Chinese).
- [10] CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, *et al.* Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10):2384-2387(in Chinese).